

Las ciencias de la tierra y el cambio climático global

Pedro J Depetris

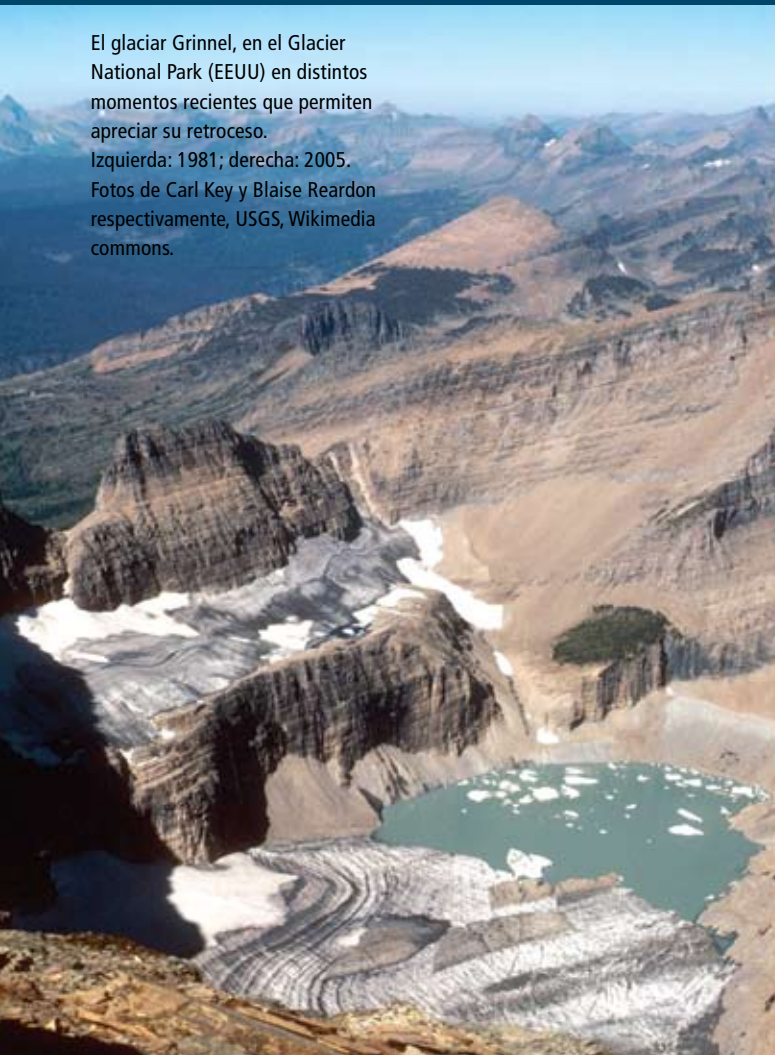
Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de Córdoba-Conicet

¿Es el cambio climático un fenómeno novedoso en la Tierra? ¿Es comparable a las alteraciones del clima del planeta que sucedieron en el remoto pasado geológico?

El glaciar Grinnel, en el Glacier National Park (EEUU) en distintos momentos recientes que permiten apreciar su retroceso.

Izquierda: 1981; derecha: 2005.

Fotos de Carl Key y Blaise Reardon respectivamente, USGS, Wikimedia commons.



Desde hace bastantes años, un número creciente de investigaciones científicas sugiere que el clima benigno disfrutado por la humanidad durante el Holoceno, es decir durante los últimos diez mil años, que permitió entre otras cosas el desarrollo de la agricultura, podría modificarse en forma significativa y en tiempo relativamente breve. ¿Es esta una situación nueva en el planeta o aconteció antes? La respuesta a la pregunta anterior no es inmediata ni sencilla. Se sabe que el clima de la Tierra sufrió enormes oscilaciones con el devenir de las eras geológicas, quizá mayores que las que se anticipan para las próximas décadas. Pero entonces la Tierra no estaba habitada por nuestra especie, y cada oscilación tardaba por lo común milenios o millones de años en producirse, mientras que ahora los cambios parecen acontecer a ritmo mucho más veloz, lo que podría causar enorme daño a los humanos y el resto de los seres vivos.

La mayor parte de la información climática que tenemos sobre el pasado histórico y prehistórico es de tipo indirecto y, en consecuencia, tiene limitado valor como base de conclusiones ambiciosas. Los primeros registros meteorológicos directos datan, en el mejor de los casos, de mediados del siglo XIX. De todos modos, tenemos suficientes evidencias para pensar que incluso en tiempos históricos se produjeron sensibles alteraciones del clima.

Las mencionadas estimaciones indirectas indican que en los últimos dos mil años hubo fluctuaciones de la temperatura media de entre 1 y 1,5 grados Celsius, que sin duda tuvieron repercusiones en las sociedades de sus épocas. La Europa boreal fue particularmente fría hasta el siglo VII de nuestra era. Luego el clima cambió y alcan-

zó un calentamiento significativo durante los siglos XI y XII, conocido en la literatura como *época cálida medieval*. Fue precisamente en esa época cuando los vikingos colonizaron Groenlandia (a la que bautizaron Tierra Verde, por su vegetación) e Islandia, y abrieron rutas de navegación en el Atlántico norte.

En la segunda mitad del siglo XIII y, nuevamente, al finalizar el XVI, las temperaturas se redujeron en forma dramática. El intenso frío quedó documentado para Europa en, por ejemplo, cuadros de pintores flamencos como Pieter Bruegel o Hendrick Avercamp, cuyas escenas invernales evocan un rigor climático hoy desconocido en los Países Bajos. Los estudiosos del clima del pasado han identificado diversos momentos particularmente fríos, entre otros los que hoy se conocen como los mínimos de Wolf (entre 1280 y 1340), de Spörer (entre 1420 y 1530), de Maunder (entre 1645 y 1714) y de Dalton (entre 1790 y 1820), los últimos asociados con la llamada *pequeña edad de hielo*, ocurrida aproximadamente entre 1550 y 1850. Suponen que estuvieron relacionados con alteraciones de la actividad solar (véase el recuadro 'Las manchas solares'). La comunidad científica está mayormente de acuerdo en que esos cambios, acaecidos en la historia reciente de la humanidad, demuestran la inestabilidad del clima en períodos largos.

Si el planeta está naturalmente sujeto a variaciones climáticas lentas y periódicas, ¿por qué sorprenderse ante, por ejemplo, el retraimiento actual de la mayoría de los glaciares, que constituye evidencia inobjetable del incremento de las temperaturas superficiales? Porque el proceso actual incluiría entre sus causas un ingrediente novedoso, ausente en el pasado: la acción humana.

El tiempo geológico. Los valores están expresados en millones de años, salvo indicación contraria. Las subdivisiones mundiales del Precámbrico no están completamente definidas, por lo que no cabe ordenar en este esquema a las que se mencionan en el texto. Una de ellas es el Proterozoico, que se suele particionar (de más reciente a más antiguo) en Neo, Meso y Paleo. También se habla de Precámbrico superior, medio e inferior. Las rocas más antiguas datadas rondan los 3800 millones de años, y la edad de la Tierra se estima en 4600 millones.

EON	ERA	PERÍODO	COMENZÓ HACE	DURACIÓN
FANEROZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	10.000 años	10.000 años
		Pleistoceno	2	2
	TERCIARIO	Plioceno	5	3
		Mioceno	24	19
		Oligoceno	37	13
		Eoceno	57	20
		Paleoceno	66	9
		Cretácico	144	78
	MESOZOICO	Jurácico	208	64
		Triásico	245	37
		Pérmico	286	41
	PALEOZOICO	Carbonífero	360	74
		Devónico	408	48
		Silúrico	438	30
Ordovícico		505	67	
Cámbrico		570	65	
PRECÁMBRICO				2800

LAS MANCHAS SOLARES

Desde mediados del siglo XX para algunos, desde sus comienzos para otros, e incluso desde los inicios mismos de la industrialización, el empleo creciente de combustibles fósiles (en especial, petróleo y carbón) y la deforestación acelerada incrementaron la concentración en la atmósfera de gases que causan *efecto invernadero*, sobre todo dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Esos gases —como los vidrios de un invernadero o de las ventanas domésticas— dejan pasar la radiación solar incidente, que calienta la Tierra, pero obstaculizan la salida al espacio de la radiación térmica de onda larga emitida por nuestro planeta así calentado, con el resultado del incremento general de la temperatura.

La mayoría de los especialistas en estas cuestiones concluyó que este proceso está efectivamente ocurriendo, y que el CO_2 es uno de sus más conspicuos responsables. En estos momentos el debate entre ellos versa sobre cuán lejos llegará el calentamiento y en qué plazos. La incertidumbre que puede existir radica en que entre los gases de efecto invernadero se cuenta el vapor de agua, más abundante que el CO_2 y que cualquier otro, pero cuyos comportamiento, interacción con este y efectos resultan más difíciles de predecir.

Si bien la noción de una crisis climática se ha difundido en tiempos recientes y ha quedado instalada en los medios de difusión y la imaginación del público, fue anticipada hace más de 160 años por el físico y matemático francés Jean-Baptiste Fourier (1768-1830), que en 1824 acuñó, precisamente, el término *efecto invernadero*. Pocas décadas después, en 1861, John Tyndall (1820-1893), físico y filósofo natural irlandés, insinuó que los cambios en la concentración del CO_2 atmosférico podrían ser parcialmente responsables de las modificaciones climáticas en la superficie terrestre. Svante Arrhenius (1859-1927), físico sueco que recibió el premio Nobel de química en 1903, sugirió en 1896 —junto con Thomas Chamberlin (1843-1928), profesor de geología en Chicago— que una duplicación del CO_2 contenido por la atmósfera produciría un calentamiento de unos 5°C en la superficie del planeta.

Durante más de medio siglo, otros científicos hicieron aportes significativos al tema, como el biólogo Geor-ge Evelyn Hutchinson (1903-1991), de la Universidad

Las manchas solares son puntos oscuros que aparecen regularmente en la superficie del Sol (también llamada *fotosfera*). Pueden tener hasta 80.000 km de diámetro, un tamaño que permite discernir las más extensas sin auxilio de un telescopio, y no permanecen estables, pues se expanden y contraen. Su origen más probable reside en perturbaciones en el movimiento de convección de la materia solar causadas por actividad magnética, que forman áreas de temperatura relativamente reducida (2700 a 4200°C) en comparación con la del resto de la fotosfera (unos 5500°C). Las zonas cercanas a las manchas se vuelven más brillantes con la aparición de estas, por lo que, en líneas generales, ellas causan un pequeño *incremento* de la intensidad de la radiación o brillo del Sol. Las manchas se multiplican con rapidez pero desaparecen más lentamente, según un ciclo irregular de unos once años. Su número está así relacionado con la intensidad de la irradiación solar, como quedó establecido mediante mediciones satelitales de esta efectuadas desde alrededor de 1980. Las manchas estuvieron escasamente presentes durante el llamado *mínimo de Maunder*, en la segunda mitad del siglo XVII, que coincidió con el período de bajas temperaturas conocido como *pequeña edad de hielo*. En la actualidad, el número de manchas está ascendiendo, luego de haber alcanzado un mínimo en 2009, es decir, la tendencia apunta al *aumento* de la radiación. Los lectores interesados en saber más podrán consultar las páginas <http://www.perseus.gr/Astro-Solar-Sunspots.htm> y <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images>.

Fotografía del Sol tomada en Buenos Aires el 8 de noviembre de 2006 a las 16:26, durante un tránsito de Mercurio (su pasaje delante la esfera solar visto desde la Tierra). Fue sacada con filtro con un telescopio de poco aumento. La marca oscura redonda, a la derecha, es Mercurio; la otra, menos redondeada y ubicada más arriba, es una mancha solar.



de Yale, considerado el padre de la limnología, quien en 1954 sugirió que la deforestación descontrolada generaba contenidos crecientes de CO_2 atmosférico. También Roger Revelle (1909-1991) y Hans Suess (1909-1993), profesores en la Universidad de California en San Diego, demostraron en 1954 que el CO_2 atmosférico no era absorbido rápidamente por el mar, como algunos científicos pensaban, y que, por ello, con el paso del tiempo se acumularía progresiva e inevitablemente en la atmósfera. Poco tiempo después, Charles David Keeling (1928-2005), de la Scripps Institution of Oceanography, comenzó a medir sistemáticamente la concentración de CO_2 atmosférico en el monte Mauna Loa, en Hawái. Al iniciar sus registros, en 1958, su valor era de 315 partes por millón en volumen (ppmv); cuando murió en 2005 había superado las 380 ppmv. Trazó una curva dentada

que se hizo célebre y constituye un registro espectacular de los efectos de la actividad humana sobre la atmósfera (figura 1).

En 1988, la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente establecieron el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés, <http://www.ipcc.ch/>). Desde entonces, este difundió varios informes que defienden la aseveración de que la acción humana es la principal responsable del calentamiento global, por lo menos desde la segunda mitad del siglo XX. En 2007, el IPCC y Al Gore, antes vicepresidente de los Estados Unidos, recibieron el premio Nobel de la paz por sus esfuerzos por construir y diseminar el mayor conocimiento sobre el cambio climático generado por el hombre y por delinear los fundamentos de las medidas que se necesitan para contrarrestar tal cambio.

En los últimos meses el IPCC fue blanco de insistentes críticas por no haber corregido con celeridad algunos errores contenidos en información que circuló acerca de los glaciares del Himalaya, y por la ligereza de ciertos comentarios hechos por algunos de sus integrantes en mensajes electrónicos privados intercambiados con colegas de la Universidad de East Anglia. Si bien las críticas no fueron infundadas, resultaron magnificadas con intenciones políticas y no comprometen los argumentos esenciales que difundió la institución.

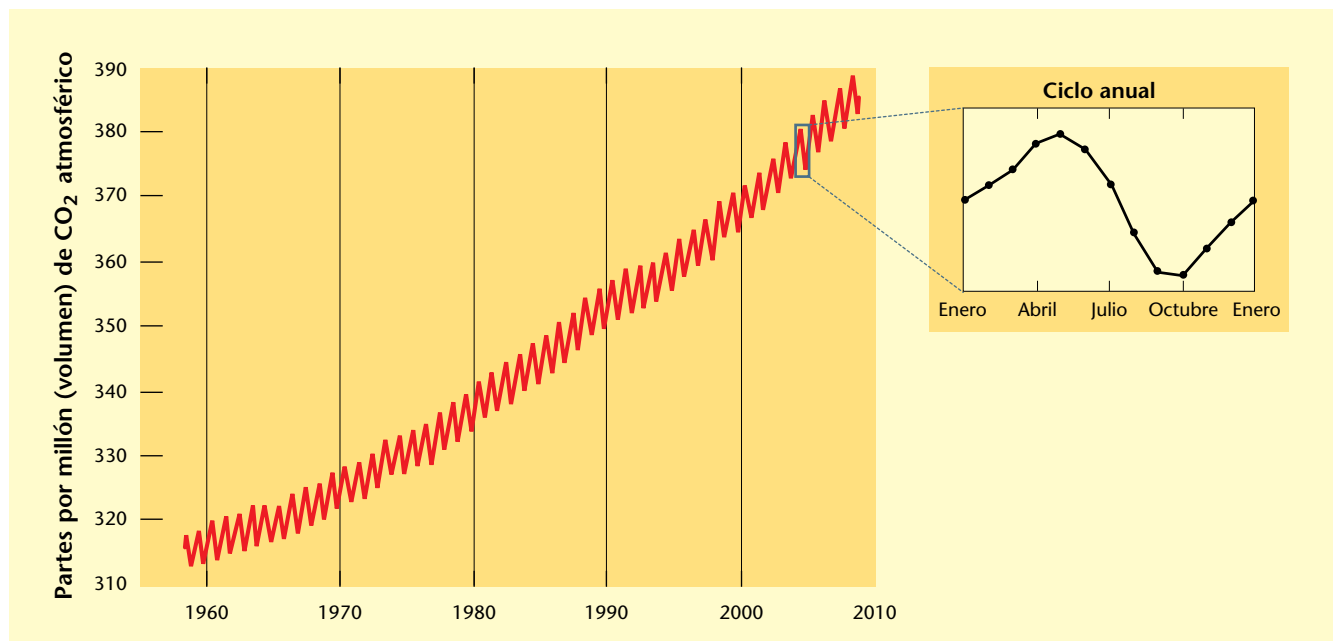
No obstante, no toda la comunidad científica está convencida de que el calentamiento global sea en buena medida de origen humano o antropogénico: hay voces muy respetables que se siguen interrogando si no es, en

realidad, producto de variaciones de la actividad solar y que argumentan en esa dirección. Sostienen que el calentamiento de la superficie terrestre observable desde 1950 se encuentra fuertemente influenciado por un ciclo de unos once años discernible en la irradiación solar, así como por otras variaciones que suceden en tiempos más cortos. Revistas como *Physics Today*, del American Institute of Physics, conforman conspicuos escenarios en que se dirime esta polémica, tanto en sus secciones de opinión como por medio de cartas de los lectores.

El clima en el pasado remoto

En el largo plazo, los cambios del clima en la Tierra están relacionados con la evolución del Sol. Hace 4600 millones de años este era entre un 25% y un 30% más débil que hoy. Desde entonces, ha ido incrementando gradualmente su emisión de radiación. Sobre esta base se puede concluir que, si la atmósfera terrestre hubiese tenido aproximadamente la composición actual, el planeta hubiera estado cubierto de hielo por lo menos durante los primeros 2000 millones de años de su existencia. Pero el registro geológico indica que tuvo océanos líquidos desde hace 3800 millones de años y que no hubo glaciares hasta hace 2700 millones de años. Esta situación se conoce como la *paradoja del sol tenue* y se explicaría por la abundancia de CO_2 en esos remotos tiempos y su efecto invernadero. Con el andar de los milenios, la concentración de CO_2 atmosférico fue disminuyendo lo suficien-

Figura 1. La curva de Keeling. Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera entre 1958 y la actualidad expresada en partes por millón en volumen y medida por Charles Keeling en el volcán Mauna Loa, Hawaii. La curva ha sido ampliamente difundida por la literatura técnica y de divulgación, por ejemplo, en <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=5620> o en http://sio.ucsd.edu/special/Keeling_50th_Anniversary/.



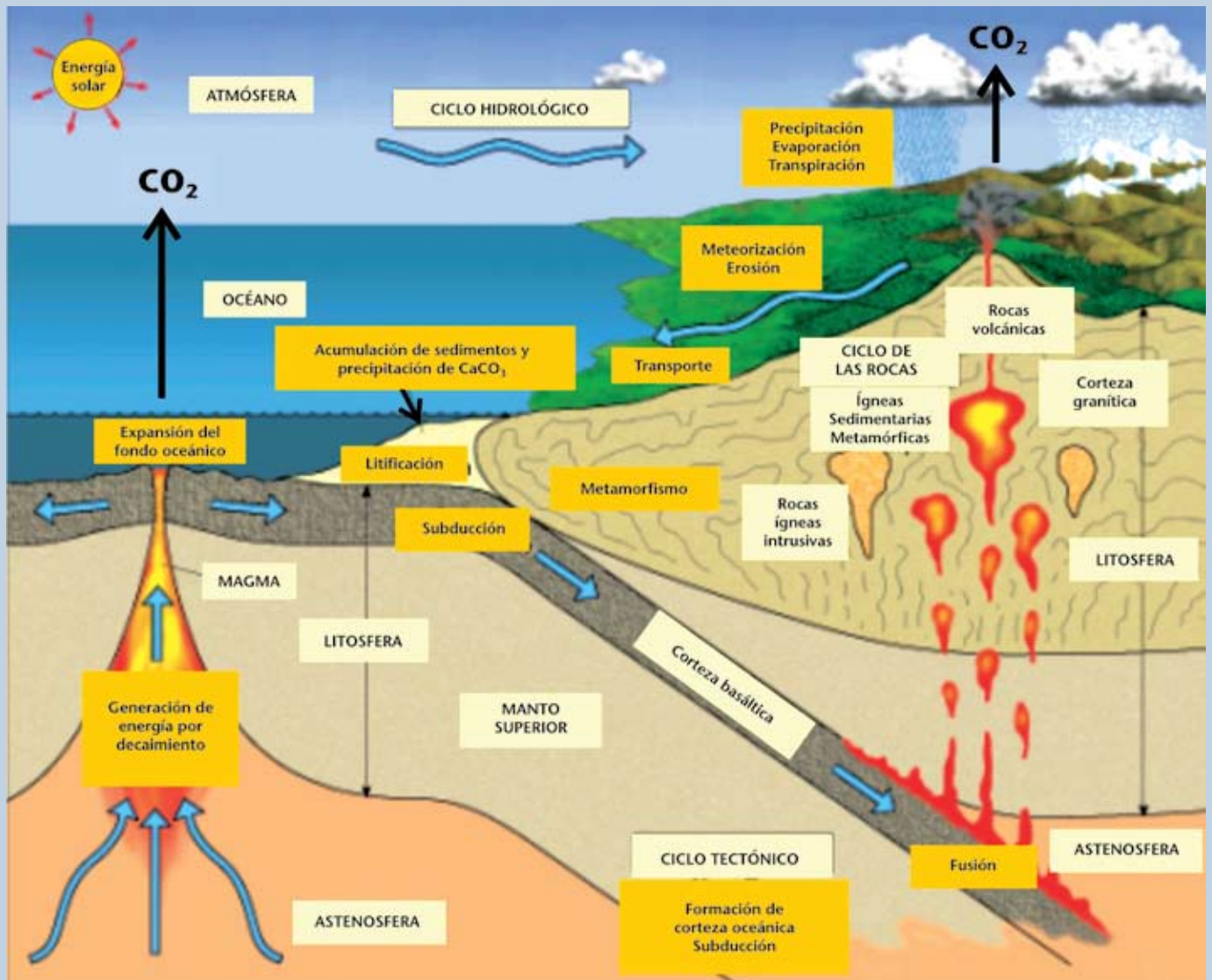
¿QUÉ ES LA METEORIZACIÓN DE LAS ROCAS?

Meteorización (en inglés *weathering*) es un término técnico empleado para designar el conjunto de procesos físicos y químicos que alteran las rocas cuando quedan expuestas en la superficie del planeta a la acción de agentes diversos. Agentes físicos, como cambios bruscos de temperatura, las quiebran y reducen el tamaño de los trozos. El incremento de la superficie de esos fragmentos con relación a rocas más grandes los expone en mayor medida a la acción del agua, que reacciona químicamente con los silicatos de los detritos, es decir, los hidroliza. Se entiende por *hidrólisis* a la reacción química por la cual los enlaces de las moléculas de agua se rompen y el hidrógeno ionizado, así como los oxhidrilos, se combinan con los componentes de los minerales e iones de la solución.

Por ejemplo, la hidrólisis de un silicato de sodio abundante en la litosfera llamado *albita* da como residuo sólido estable una arcilla, el caolín, y subproductos disueltos en el agua, como sodio y

ácido silícico. El CO_2 consumido por la reacción no retorna a la atmósfera en su totalidad, pues de existir calcio en solución, en determinadas condiciones se produce la precipitación inorgánica de carbonato de calcio o su incorporación a las estructuras sólidas de la biota marina.

En la hidrólisis de un silicato, de cada dos moléculas CO_2 que participan en esa reacción, una retorna a la atmósfera, mientras la otra permanece inmovilizada en el carbonato de calcio, que puede considerarse, en consecuencia, un sumidero de carbono. Sin embargo, el plancton marino y la innumerable cantidad de seres que sintetizan carbonato de calcio en el mar son cuantitativamente más importantes que los mecanismos químicos de precipitación de carbonatos en los continentes, por cuanto contribuyen a inmovilizar el carbono por tiempos geológicamente más prolongados.



El gas CO_2 reingresa en la atmósfera luego de muchos millones de años como producto de la subducción de la corteza marina y de su expansión, consecuencia a su vez de la deriva continental. El levantamiento de cordones de montañas durante los últimos 40 millones de años puede haber acelerado la meteorización de las rocas, al instaurar monzones, y el escurrimiento superficial del agua sobre escarpas geológicas frescas. Estos cambios, durante aproximadamente el último millón de años, pueden haber disminuido los niveles de CO_2 atmosférico, morigerado el efecto invernadero y enfriado globalmente el planeta.

te como para compensar el sostenido incremento de la radiación solar. Y dado que ese delicado balance puede no haber funcionado bien durante lapsos prolongados, se piensa que hubo algún mecanismo de compensación operando en períodos con alta concentraciones de CO_2 en la atmósfera o con incremento en la irradiación solar. Ese mecanismo es la geoquímica de los silicatos y carbonatos, que puede reciclar el 80% del CO_2 de la Tierra en aproximadamente medio millón de años (véase el recuadro '¿Qué es la meteorización de las rocas?').

A pesar de los procesos que operaron en la paradoja del sol tenue, el clima terrestre fue variando marcadamente a lo largo del tiempo geológico, con una oscilación de entre 5°C por encima y 10°C por debajo de los valores actuales (figura 2). No resulta factible, empero, determinar con alguna precisión la naturaleza del clima más allá de los 1000 millones de años, en una división del Precámbrico llamada Proterozoico. Antes, en el Precámbrico medio (hace unos 2500 millones de años), el clima era más cálido y húmedo que en la actualidad, como también lo era en el Cretácico, hace unos 100 millones de años, o a comienzos de la era Cenozoica, hace unos 66 millones de años.

Los períodos con bajas temperaturas y extensas áreas cubiertas con hielos resultan más fascinantes que los cálidos, quizá porque parecen haber tenido climas comparativamente más severos que estos. Por ejemplo, hace 750 millones de años, en el Neoproterozoico, habría acontecido una sorprendente reversión climática, la más extrema acaecida en este planeta, el que se habría congelado casi en su totalidad, con un espesor de hielo en los océanos de más de un kilómetro. Al caer las temperaturas hasta -50°C , la vida habría desaparecido durante 10 millones de años o más, con la sola excepción de microscópicos organismos primitivos que sobrevivieron al calor de fumarolas o géiseres.

¿Cómo se inició ese enfriamiento? Se puede pensar que la fragmentación hace 770 millones de años de la primitiva masa continental única en diversos continentes ubicados en la cercanía del ecuador facilitó la absor-

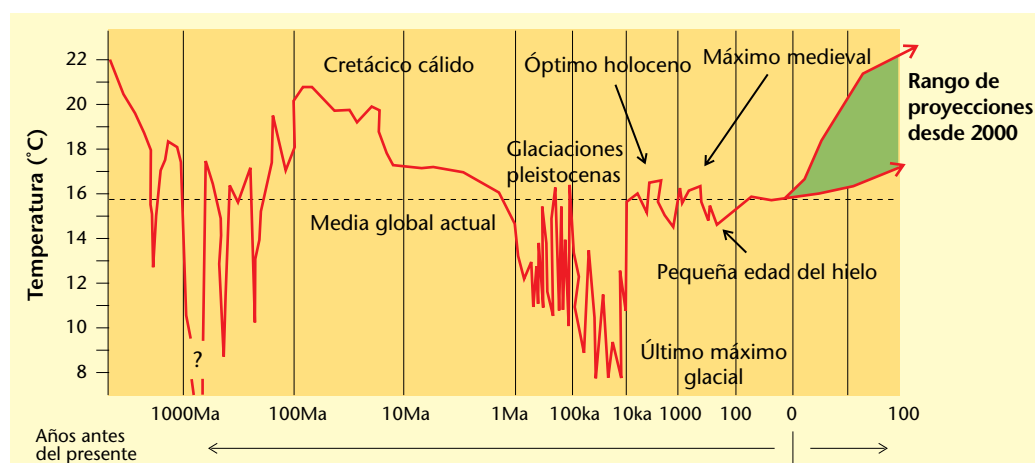
ción de CO_2 atmosférico por los mares, la atenuación del efecto invernadero que este creaba en la atmósfera y el descenso general de las temperaturas. Los resultantes casquetes polares de hielo reflejaron más eficazmente la radiación solar y condujeron a un mayor enfriamiento. El acelerado proceso culminó en menos de un milenio.

El planeta resurgió del estado de congelamiento profundo hace 580 millones de años, merced a un paulatino nuevo efecto invernadero, producido por un incremento de origen volcánico de la concentración de CO_2 en la atmósfera. En unos siglos, la Tierra fue nuevamente cálida y húmeda, propicia para la evolución de la vida. Desde mediados de la década de 1990, el geólogo canadiense Paul F Hoffman (nacido en 1941), profesor en la Universidad de Harvard, fue la figura conductora de las investigaciones de este período.

El congelamiento Neoproterozoico (que es parte del Precámbrico) no resultaría posible en la actualidad porque la configuración de los continentes es sustancialmente distinta. Esta quedó determinada en el Terciario, después de la fase final de formación de los grandes sistemas montañosos y de la nueva constitución de casquetes polares. Por ello, el tiempo geológico que debe observarse con mayor cuidado para entender el sistema climático presente es la era Cenozoica, desde comienzos del Terciario, hace algo más de 66 millones de años.

El conocimiento aportado por las ciencias de la tierra también permite aseverar que en el pasado geológico remoto el clima terrestre alcanzó temperaturas extremadamente tórridas. Tanto el CO_2 como el CH_4 desempeñaron papeles fundamentales en el máximo termal acaecido entre el Paleoceno y el Eoceno, hace 55,8 millones de años. La transición aconteció con temperaturas superficiales incrementadas entre 5°C y 7°C , las que perduraron por más de 150.000 años, probablemente a raíz de un aumento de gases de efecto invernadero originados en la profundidad del manto terrestre. Durante ese período los polos estuvieron casi libres de hielo: cocodrilos y tortugas llegaron hasta los 75° de latitud norte y crecieron palmeras en lo que hoy es la península de Kamchatka, en

Figura 2. Temperatura media en la superficie de la Tierra a lo largo del tiempo geológico, desde el Proterozoico (una división del Precámbrico), más de mil millones de años atrás. El tiempo está medido en escala logarítmica, con discontinuidades hace un millón de años y en el presente. Gráfico dibujado siguiendo a Bryant (1997).



Siberia oriental. Adviértase, pues, cómo el planeta respondió en el pasado al efecto invernadero.

Luego de ese período cálido y a lo largo de prácticamente todo el Plioceno, el clima terrestre evolucionó hacia un régimen más frío. El hielo glacial estuvo presente en la Antártida durante los últimos 60 millones de años, desde que el continente se ubicó sobre el Polo Sur terrestre. Hace unos 2,4 millones de años las temperaturas comenzaron a fluctuar entre 4°C y 10°C cada 40.000 a 100.000 años, y comenzaron a formarse abundantes glaciares en todos los continentes (y extensas masas de hielo en algunos). En cada ocasión en que la Tierra experimentaba un período frío, el nivel de los océanos descendía entre 100 y 130m por debajo de su nivel actual.

El último millón de años de historia climática

Buena parte de quienes desean aportar al conocimiento del hoy llamado *cambio climático global* observan con especial atención lo acontecido durante el Cuaternario, es decir, el último millón de años, o nuestro pasado geológico y climático reciente. Ese estudio, como todo lo relacionado con la historia de la Tierra, es tarea interdisciplinaria, que requiere de la intervención de muchos campos de la ciencia. Por ello, una parte importante de la comunidad científica internacional, enrolada en un gran número de esos campos, procura aportar luz a la historia climática de nuestro planeta.

El levantamiento de cordones montañosos y mesetas es un proceso geológico estrechamente vinculado con la alteración de patrones climáticos regionales y globales, por los cambios que produce en la circulación atmosférica y oceánica, los que, a su vez, alteran la intensidad y el tipo de erosión que degrada los terrenos montañosos. Cuando la erosión libera parcialmente a zonas de la corteza terrestre del peso de las capas rocosas superiores, se produce un levantamiento isostático o rebote, que por lo común solo recupera parcialmente la altura perdida por desgaste o de-

nudación. Este no es más que un ejemplo de las complejas interacciones entre corteza terrestre y clima, cuyo estudio requiere tener en cuenta, entre otros factores, los cambios operados en la configuración de la litosfera, la atmósfera (temperatura, vientos, niveles de CO₂), la hidrosfera (vapor de agua, precipitaciones, escurrimiento superficial y circulación oceánica), la criosfera (hielos continentales, glaciares, hielos marinos) y la biosfera (cantidad y tipo de vegetación, balance del carbono).

El levantamiento de montañas y mesetas, además, tiene un efecto indirecto pero potencialmente intenso sobre el clima global, debido a que la descomposición de rocas con silicatos puede absorber o 'secuestrar' CO₂ atmosférico, como se explica con más detalle en el recuadro '¿Qué es la meteorización de las rocas?'.
Si tomamos, a título de ejemplo, los avances glaciales del Pleistoceno, hace aproximadamente dos millones de años, podemos agrupar los factores que determinaron modificaciones climáticas en cuatro categorías:

- Factores externos a la Tierra y su atmósfera, como las alteraciones cíclicas de la órbita terrestre descritas en la década de 1920 por el matemático serbio Milutin Milankovitch (1879-1958), entre ellas las que afectan su excentricidad (cada 96.000 años), oblicuidad (cada 41.000 años) y precesión (entre cada 19.000 y 23.000 años).
- Factores propios de los océanos y la atmósfera, como la circulación termohalina de los océanos (complejo fenómeno en el que no podemos entrar acá, pero sobre el que damos una referencia al final), o los cambios en las concentraciones de CO₂ y CH₄.
- Factores geológicos, como el ascenso de cadenas montañosas y la actividad volcánica.
- Factores aleatorios, propios de un sistema tan complejo.

La periodicidad de las glaciaciones que tuvieron lugar durante aproximadamente los últimos dos millones

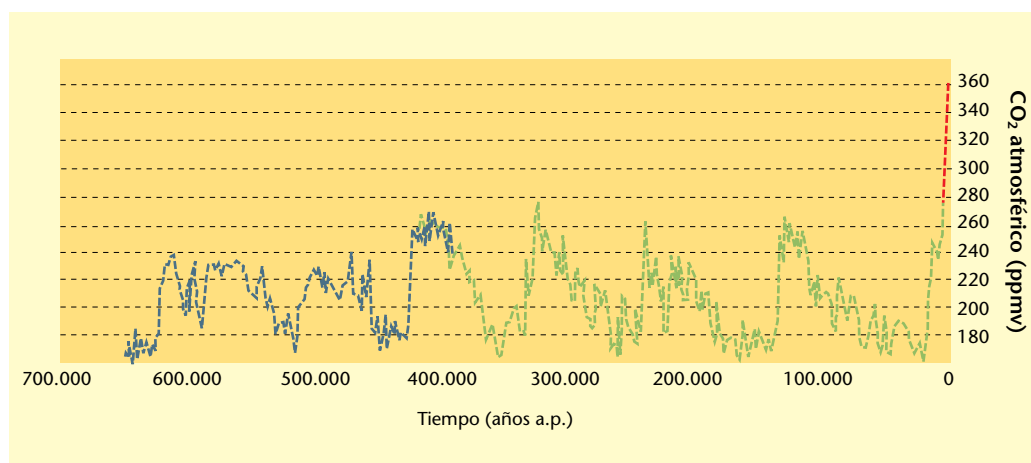


Figura 3. Concentración del CO₂ atmosférico en partes por millón en volumen, inferida a partir de testigos de hielo tomados por el proyecto EPICA (línea azul) y en la estación polar antártica rusa de Vostok (línea verde), así como medida instrumentalmente (línea roja).

de años estuvo en buena medida dada por los cambios en la distribución de la radiación solar incidente, controlada, a su vez, por variaciones orbitales de la Tierra definidas en los ciclos de Milankovitch. Pero esas variaciones orbitales no alcanzan para explicar los cambios de unos 5°C que acontecieron entre los máximos glaciales y los períodos interglaciales como el que estamos viviendo. Las consecuencias de las variaciones orbitales son amplificadas por cambios en el albedo o capacidad del planeta de reflejar los rayos solares, provocados a su vez por modificaciones de la extensión cubierta por hielos continentales y marinos. También influyen las alteraciones en la concentración del CO₂ atmosférico (figura 3). Además, las variaciones de temperatura afectan directamente esa concentración, pues modifican su solubilidad en el agua de mar, la afectan indirectamente por las alteraciones de la circulación atmosférica y, quizá también, por incremento de la aridez y la dinámica del polvo atmosférico. El CO₂, por su parte, influyen en la temperatura por el efecto invernadero.

Las fluctuaciones de la concentración del CO₂ en la atmósfera terrestre en el tiempo geológico y su asociación con la temperatura y, en general, el clima de nuestro planeta han llevado a formular un par de interesantes hipótesis explicativas del proceso. Una es la hipótesis BLAG, acrónimo de quienes la formularon, Robert A Berner, Antonio C Lasaga y Robert M Garrels, de las universidades de Yale y del Sur de la Florida. Se basa en que la principal fuente de CO₂ atmosférico está asociada con la alteración de las rocas por efectos de las presiones y de la temperatura en la corteza terrestre (fenómeno llamado metamorfismo) y con la transferencia de gases a la atmósfera por las erupciones volcánicas que tienen lugar a causa de la deriva continental en áreas de subducción de la corteza terrestre y en la dorsal oceánica central. Estos fenómenos geológicos serían, así, el principal mecanismo de suministro de CO₂ a la atmósfera, algo que data del comienzo mismo de la historia de nuestro planeta.

La hipótesis BLAG, además, sostiene que existen compensaciones por las cuales el sistema climático permanece en situación de cuasiequilibrio. Una mayor emisión de CO₂ a la atmósfera por aceleración del crecimiento del fondo oceánico incrementa la temperatura del aire, aumenta el nivel de vapor de agua, multiplica la vegetación y acelera la velocidad de las reacciones químicas en la superficie terrestre. Estos cambios generan un aumento de la descomposición química por hidrólisis de los silicatos, que absorbe la mayor parte del incremento inicial de CO₂. Contrariamente, cuando la velocidad de construcción de los fondos oceánicos disminuye, la cantidad de CO₂ introducido en la atmósfera también lo hace y se produce la sucesión inversa de fenómenos. Este mecanismo mantendría al sistema muy cerca del equilibrio.

Contrasta con esta hipótesis la de Maureen Raymo, según la cual el factor preponderante en la reducción en

el largo plazo del CO₂ atmosférico y en la regulación del clima del planeta sería la *meteorización*, es decir la disgregación de rocas, suelos y minerales por simple contacto con la atmósfera y sin traslado de los restos o fragmentos, como ocurre con la erosión.

El vínculo entre ascenso de cadenas montañosas, meteorización y cambio climático fue inicialmente sugerido hace casi un siglo por Chamberlin, el geólogo de Chicago mencionado antes, que notó una aparente correlación en la historia geológica entre fenómenos de reacomodamiento de la corteza terrestre (o tectónicos) y climas glaciales. Su hipótesis completa es compleja e incluye elementos especulativos que ahora se reconocen como incorrectos. Había caído en el olvido hasta que Raymo, de la Universidad de Boston, concibió con sus colaboradores una hipótesis similar para explicar una cantidad de datos geoquímicos recientes que indicaban una concentración declinante en la historia geológica del CO₂ atmosférico. Así, la hipótesis de Raymo sugiere que los levantamientos de la corteza terrestre podrían haber incrementado la velocidad de remoción del CO₂ de la atmósfera por los efectos combinados de varios factores, pues:

- la generación de fracturas geológicas expone a la atmósfera rocas no meteorizadas;
- la vigorosa meteorización se produce en zonas montañosas, por las pendientes pronunciadas, la falta de vegetación y los procesos glaciales o periglaciales, y
- las precipitaciones atmosféricas estivales en las áreas de barlovento de las mesetas altas, y las lluvias de verano e invierno en las pendientes de barlovento de las cadenas montañosas.

Estos factores generan un gran volumen de detrito rocoso, finamente dividido, que en ambientes húmedos promueve la meteorización química. La hidrólisis de los silicatos continúa mientras el detrito es transportado hacia el mar por los ríos y distribuido a lo largo y a lo ancho de los grandes valles de inundación y de los deltas, en un marco de climas más cálidos y húmedos.

La hipótesis de Raymo recibió el decidido apoyo de la comunidad científica: su aceptación es considerablemente superior a la del BLAG. Si bien los argumentos que la sustentan son abultados y complejos, y su tratamiento pormenorizado está más allá de las posibilidades de este artículo, pude hacerse un enunciado sucinto de sus aspectos más significativos como sigue:

- El levantamiento cenozoico (iniciado hace unos 140 millones de años) produjo la mayor parte de las cadenas montañosas actuales. Sin embargo, sobre los altiplanos andinos de Sudamérica, la meseta del Tíbet y los Andes orientales se pueden hallar sedimentos marinos cretácicos, lo que indica que

muchas mesetas altas y cordones montañosos actuales son más antiguos.

- Teresa Eileen Jordan y sus colaboradores de la Universidad de Cornell sostienen que la orografía moderna es la más alta de toda la historia geológica. En ese sentido, se destaca entre los continentes la meseta tibetana, con una altura media superior a los 5000m sobre el nivel del mar —contra unos 3500m del altiplano boliviano— y una extensión de más de cuatro millones de kilómetros cuadrados.
- Los levantamientos cenozoicos tuvieron marcados efectos en la circulación atmosférica y, en general, en el clima. Así, enfriaron regiones de mesetas altas en latitudes medias, como el Tíbet, e incrementaron la precipitación atmosférica de todo orden. También, agregaron perturbaciones al flujo atmosférico por el contraste entre las temperaturas de continentes y océanos, y favorecieron la aridez de regiones continentales de latitudes medias.
- El ascenso cenozoico tuvo igualmente un marcado efecto sobre la meteorización física y química e incrementó la acumulación de sedimentos marinos.
- Merced a sus efectos sobre la dinámica de la meteorización, el ascenso cenozoico bajó los niveles de CO₂ atmosférico, generó un enfriamiento vinculado con las glaciaciones cuaternarias y provocó una disminución de la humedad.

La última edad de hielo o último período glacial alcanzó su apogeo hace unos 22.000 años. Desde entonces, la Tierra ha disfrutado de un período cálido, conocido como interglacial, que sobrevino de manera

notablemente abrupta, porque las temperaturas se incrementaron varios grados Celsius hasta alcanzar sus valores actuales en menos de una década. No obstante, los glaciares y las masas de hielo continental aún conservan alrededor de un 25% del volumen de hielo presente durante el mencionado apogeo glacial.

En contra de la hipótesis de Raymo es posible argumentar que buena parte de la masa de sedimentos que se traslada sobre la superficie del planeta, ahora o en el pasado geológico, es, en gran medida, producto de un reciclado. Esto es, proviene de zonas en las que abundan los afloramientos sedimentarios adecuadamente meteorizados, que no consumen tanto CO₂ atmosférico como los materiales frescos. Pero los modelos matemáticos y algunos estudios recientes sustentan la hipótesis pues establecen que aunque la meteorización química en esas zonas sea baja, la extensión de las áreas elevadas es de tal magnitud que la meteorización y el secuestro de CO₂ asociado con ellas es globalmente muy importante, y con toda probabilidad fue así a comienzos del Cenozoico.

Se puede concluir que la hipótesis de Raymo provee la explicación más admisible sobre los cambios climáticos geológicamente más recientes experimentados por la Tierra. Ante las disyuntivas que plantean las actuales constataciones de influencias antropogénicas en el clima, podemos recordar las palabras de Roger Revelle y Hans Suess, escritas en 1957: ...los seres humanos están llevando a cabo un tipo de experimento geofísico en gran escala, que no podría haber acontecido en el pasado o que no podrá reproducirse en el futuro. En un lapso de pocos siglos estamos devolviendo a la atmósfera y a los océanos el carbono orgánico concentrado que las rocas sedimentarias han guardado por cientos de millones de años. **CH**

LECTURAS SUGERIDAS

BERNER RA, LASAGA AC & GARRELS RM, 1983, 'The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the last 100 million years', *American Journal of Science*, 283:641-683.

BRADLEY RS, BRIFFA KR, COLE J, HUGHES MK & OSBORN TJ, 2003, 'The climate of the last milenium', en ALVERSON KD et al. (eds.), *Paleoclimate, Global Change and the Future*, Springer, Heidelberg, pp. 105-141.

BRYANT E, 1997, *Climate Processes & Change*, Cambridge University Press.

HOFFMAN PF, KAUFMAN AJ, HALVERSON GP & SCHRAG DP, 1998, 'A Neoproterozoic snowball Earth', *Science*, 281:1342-1346.

RUDDIMAN WF, 1997, *Tectonic Uplift and Climate Change*, Plenum Press, Nueva York.

Acerca de la circulación termohalina se puede consultar en internet, en castellano, el sitio <http://www.cimar.ucr.ac.cr/Oceanografia/capitulo7.pdf>, y en inglés, http://cdiac.ornl.gov/oceans/glodap/glodap_pdfs/Thermohaline.web.pdf. También por internet se puede acceder al libro *Introduction to Physical Oceanography*, de Robert Stewart, en http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book_pdf_files.html.



Pedro J Depetris

Doctor en ciencias geológicas, Universidad Nacional de Córdoba.

Profesor emérito en la UNCOR.

Investigador superior del Conicet.

Académico secretario, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

Académico correspondiente, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Buenos Aires
pdepetris@com.uncor.edu